熱処理 PC 鋼棒のレラクセーション性について*

辻 村 昂** 小 林 弘** 谷 餘士雄** 山本俊二**

Relaxation Property of Heat-Treated Prestressed-Concrete Steel Bar

by

Takashi TSUJIMURA, Hiroshi KOBAYASHI, Shunji YAMAMOTO
and Yoshio TANI

(Kobe Steel Works, Ltd., Kobe, Hyogo)

For the prestressed concrete steel bar, a smaller amount of relaxation is required together with higher mechanical properties.

We studied on the relaxation property of prestressed-concrete steel bars which had heat treated carbon steel, spring steel, and low alloy steel to 115 kg/mm² and 130 kg/mm² in ultimate strength.

In the experiment, we observed that S30C, S40C, S50C relaxed over 3% for 20 hours under the initial stress of about 80 % of actual yield strength, SAE1041, SCr-2 relaxed 2 to 3 % and SCM 2, SCM 4, SUP 9 relaxed about 1 %

As for the relation of the relaxation with mechanical properties, it is recognized that the amount of relaxation is inclined to decrease with the increases of ratio σ_s/σ_B and of elongation. It was concluded that, the steel bar which had tempered at high temperature and was sufficient in regard to mechanical properties, was excellent also from the view point of relaxation.

(Received Aug. 28, 1962)

1. 緒 言

最近各種の建築構造物に PS コンクリート工法が広範囲に利用されるすう勢にある。わが国においても国情に適した PS コンクリート工法の普及発展のため、1956年材料試験協会プレストレスト・コンクリート構造研究委員会が設置され、種々な面から研究が実施されてきた。また、1960年プレテンション用材料に限定した PC 鋼線、および PC 鋼より線に関する JIS 規格の設定を見た。鋼棒に関しても逐次規格化されるものと考えられる。これら PC 鋼棒の機械的性質としては、

降伏点、引張強度、伸び、絞り等が大きいことが必要であるが、コンクリート構造物として、半永久的な用途に使用される関係上、レラクセーション量の少ないことが必要である。しかし現状では、この方向の研究資料が少ないので、本稿では PC 鋼棒のレラクセーション特性と成分的関連性を究明するため、構造用炭素鋼、ばね鋼、低合金鋼を選んでレラクセーション性の検討を行なった結果につき報告する。

2. 供 試 鋼 棒

供試鋼棒は Table 1 に示すような構造用炭素鋼の

Table 1 Chemical compositions of materials

Type of steels	Designation	Test No	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
Carbon steel	S30C	A	0.31	0.74	0.30	0.019	0.029	0.10	0.05	0.06	—
	S40C	B	0.43	0.61	0.30	0.013	0.022	0.06	0.05	0.06	—
	S50C	C	0.48	0.71	0.30	0.016	0.026	0.11	0.05	0.09	—
	SAE 1041	D	0.39	1.57	0.23	0.015	0.018	0.16	0.09	0.08	—
Spring steel	SUP-6	E	0.61	0.82	1.77	0.016	0.008	0.09	0.05	0.07	—
	SUP-9	F	0.55	0.79	0.25	0.014	0.013	0.19	0.13	0.84	—
Low alloy steel	SCr-2	G	0.31	0.69	0.19	0.019	0.013	0.15	0.07	1.03	—
	SCr-4	H	0.38	0.71	0.23	0.021	0.025	0.17	0.18	1.04	—
	SCM-2	I	0.29	0.66	0.25	0.019	0.024	0.17	0.10	1.08	0.27
	SCM-4	J	0.39	0.72	0.35	0.015	0.016	0.15	0.14	1.11	0.27

* 原稿受付 昭和37年 8 月28日 ** 株式会社神戸製鋼所

S30C, S40C, S50C, SAE 1041 鋼, ばね鋼の SUP-6, SUP-9 低合金鋼の SCr-2, SCr-4, SCM-2, SCM-4 合計 10 種類である。供試鋼棒は 19 mm 径の圧延鋼棒を使用した。ただし、一部 19 mm 径のものが、入手できなかったため、機械加工によって所定の寸法に仕上げたものもある。試験に使用した試験片は、後述

Fig. 1 Dimension of specimen

Table 2 Mechanical properties intended (Nominal)

Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (GL; 8D) (%)
>100	>115	>6
>115	>130	>5

する機械試験、レラクセーション試験片ともすべて Fig. 1 に示す、全長 400 mm に切断した寸法形状のものを使用した。

3. 供試鋼棒の熱処理条件ならびに機械試験

本試験では、すべて焼入焼もどし処理した鋼棒についての性能を調べたものである。目標とした機械的性質を Table 2 に示す。したがって、まずこれらの目標とする 2 種類の強度を満足する鋼棒を準備するため、ニクロム抵抗線電気炉を使用して、熱処理温度の検討を行なった後、鋼棒の引張試験を実施した。Table 3 に試験成績を示す。すなわち、耐力 115 kg/mm² 引張強度 130 kg/mm² 以上を目標とした場合は、S30C, S40C が耐力、伸び数値を満足しない。また、SCr-4, SCM-2 の伸び数値が少なく、目標 5 % の最低値に相当する。また耐力 100 kg/mm² 引張強度 115 kg/mm² を目標とした場合は、S40C のみが耐力、伸び数値を満足しない。この鋼棒は熱処理不充分によるためであったが、熱処理を完全に行なえば、目標の強度を満足すると考えられる。この試験では耐力 115 kg/mm² を

Table 3 Mechanical properties obtained (Actual)

Type of steel	Designation	Test No	Quenching temperature (°C)	Tempering temperature (°C)	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	$\sigma_{0.2}/\sigma_B$
Carbon steel	S30C	A	850/30' W.Q	250/2h O.T	102・0	135・0	4・2	20	0・76
	S40C	B	"	200 "	100・0	120・0	3・0	8	0・84
	S50C	C	"	400 "	120・0	132・0	6・6	34	0・91
	SAE 1041	D	850/30' O.Q	400 "	127・0	130・0	6・2	12	0・88
Spring steel	SUP-6	E	835/30' O.Q	500 "	112・0	137・0	7・3	13	0・82
	SUP-9	F	"	550 "	124・0	130・0	7・0	10	0・95
Low alloy steel	SCr-2	G	855/30' O.Q	370 "	125・0	130・0	6・0	30	0・92
	SCr-4	H	"	470 "	130・0	140・0	5・0	30	0・93
	SCM-2	I	"	430 "	125・0	137・0	5・0	45	0・91
	SCM-4	J	"	530 "	123・0	130・0	7・3	46	0・95
Mechanical properties intended				—	>115	>130	>5・0	—	—
Carbon steel	S30C	A	850/30' W.Q	350/2 h O.T	100・0	118・0	6・5	44	0・85
	S40C	B	"	300 "	97・0	112・0	4・0	15	0・87
	S50C	C	"	450 "	104・0	115・0	8・6	46	0・90
	SAE 1041	D	850/30' O.Q	450 "	102・0	123・0	6・6	36	0・83
Spring steel	SUP-6	E	835/30' O.Q	550 "	102・0	121・0	8・6	24	0・85
	SUP-9	F	"	620 "	113・0	124・0	11・0	31	0・92
Low alloy steel	SCr-2	G	855/30' O.Q	400 "	116・0	127・0	6・6	41	0・91
	SCr-4	H	"	530 "	110・0	116・0	8・8	44	0・95
	SCM-2	I	"	500 "	111・0	121・0	6・0	46	0・92
	SCM-4	J	"	600 "	116・0	123・0	10・0	51	0・94
Mechanical properties intended				—	>100	>115・0	>6・0	—	—

目標とした場合の S30C のみが目標の機械的性質を満足しなかったが、ほかの鋼棒は目標値を満足する結果が得られた。供試鋼棒の中では SUP-6, SUP-9, SCM-4 は機械的性質のすぐれた成績を示す。

4. レラクセーション試験

PC 鋼棒は一般に使用される機械構造部品に採用される設計許容応力に比べて非常に高い負荷応力を導入して、建築構造物として長期の使用に耐える性能を有するものでなければならない。したがって、PC 鋼棒のように、常温の使用条件においても耐レラクセーション性(応力し緩量)が重要視されるわけである。この種の性能試験としては、常温におけるクリープ試験あるいはレラクセーション試験が実施されている。本試験では 50ton 容量のレラクセーション試験機を使用して応力し緩量の測定を行なった。レラクセーション試験は、所定の導入荷重を加えて、塑性伸びが生ずると荷重を減らして弾性伸びを減じ、全ひずみを常時一定に保ちつつ、この間に生ずる応力し緩量と、時間の関係を調べる試験である。レラクセーション試験は、クリープ試験と同様長時間の試験も必要で、測定精度も厳密な条件が要求される。これら試験条件を Table 4 に示す。Photo. 1 は試験機の外観写真である。また Photo. 2 は試験鋼棒に伸び検出器を取りつけた状態を示したものである。本試験の最初の導入荷重を負荷する機構は、オルゼン形万能材料試験機の構造と同じである。試験鋼棒は上下ベットのチャック部で取りつける。レラクセーション検出機構は、試験鋼棒の標点部(この試験では標点距離 200 mm)に装着された、差動鉄心形検出器の差動を電子管式増巾装置に導入してサーボ・モータの回転に変え、この回転をさらにレ

クセーションの負荷増減機構に連動する装置が追加されている。導入応力は目標耐力の 80 % と実測耐力の 80 % の場合について実施した。現在、PC 鋼棒の許容引張応力度は、材料試験協会設計施工指針、建築学会設計施工規準、土木学会設計施工指針で Table 5 のように多少異なった数値を採用しているが、PC 鋼棒はそれぞれの規定値の耐力、引張強度を保証するため規格値より高い強度を有する。したがって、実際使用時の実測耐力に対する導入応力の比は、この試験条件ほど高くないので、試験条件は鋼棒の実用条件よりかなり酷な導入荷重を加えたことになる。また、試験時間は 20 時間一定とし、この間に生じた荷重の減少はペン書きドラムに記録すると同時に、1 定時間ごとに荷重目盛の減少量を読み取るようにした。ドラムに記録した荷重減少と時間の関係で示されるレラクセーション曲線は、荷重導入後 15~30 分のごく初期の段階において、荷重の減少が激しく、その後は緩慢となり、定常域を示すが、全鋼種をつうじて 20 時間程度では完全に荷重の減少は終了しない。この荷重と時間の関

Photo. 2 Elongation detecting apparatus

Table 4 Test conditions

Room temp. : 23~27°C humidity 50~60%
Accuracy in elongation measurement : 1/1 000 mm
Accuracy in loading : <1%
Testing machine : Olsen type relaxation tester

Photo. 1 Relaxation testing machine

Table 5 Comparison of allowable stress extent

	The Japan Institute of Civil Engineerings (Smaller value out of the followings)	Architectural Association of Japan	Jornnal of the Japan Society for Testing Materials (JSTM)
Stress under design load	0.6 σ_{pu} 0.75 σ_{py}	—	—
Maximum stress extent	0.7 σ_{pu} 0.85 σ_{py}	0.7 σ_{py}	0.7 σ_{py}
Maximum stress extent of under stretching	0.8 σ_{pu} 0.9 σ_{py}	0.735 σ_{py}	0.75 σ_{py}

σ_{pu} = ultimate strength
 σ_{py} = yield strength

係を時間軸を対数目盛とした半対数表で示したのが Fig. 2 である. Fig. 2 は実測耐力の 80 % の導入応力条件で試験したレラクセーション量の比較的大なるものと, 小なるものについての一例である. レラクセーション量の比較的小ないものはほぼ直線関係が認められるが, レラクセーション量の多い鋼棒は 1 ~ 2 時間

で曲線となる傾向があり, 長時間の外挿値はかなり大きなものとなるようである. なお, 試験時間内でのばらつきは比較的少ない結果が得られている. 以上のようにして求めたレラクセーション試験の総合結果を Table 6 に示す. 既述のようにこの試験では導入応力は目標耐力 115 kg/mm² と 100 kg/mm² の 80 % の場合と実測した耐力の 80 % の 2 条件で試験したので, これらの結果を整理して, 導入応力/実測耐力比とレラクセーション量の関係で示すと Fig. 3, 4 のようになる. すなわち, 図の縦軸の導入応力/実測耐力比が 1 の場合が耐力値に相当する値で, この試験の範囲では, 導入荷重は実測耐力のほぼ 70 ~ 80 % で試験したことになる. 各供試鋼棒のレラクセーション量を比較すると, 炭素鋼は一般にレラクセーション量が多い. とくに, S 40 C 材は目標耐力 115 kg/mm² の場合は, 荷重導入後 20 分で破断した. この場合の導入荷重は実測耐力の 92 % に相当するが, 短時間破断の原因は, 不完全焼入焼もどし組織を呈するものであったことにもよる. 本鋼棒は目標耐力 100 kg/mm² の場合の導入

Fig. 2 Typical relaxation curve
($\sigma_{0.2} \times 80\%$)

Table 6 Results of a relaxation test

Type of steels	Designation	Test No	Yield strength (kg/mm ²)	at 80% of nominal yield strength		at 80% of actual yield strength	
				Relaxation (%) (20h)	Stretching stress	Relaxation (%) (20h)	Stretching stress
					Actual yield ratio strength		Actual yield ratio strength
$\sigma_{0.2}$ 115 kg/mm ²	Carbon steel	S 30C	A	5.08	0.90	3.46	0.80
		S 40C	B	Rupture (26)	0.92	3.05	"
		S 50C	C	4.19	0.77	4.50	"
		SAE 1041	D	1.46	0.73	2.50	"
	Spring steel	SUP-6	E	2.28	0.82	1.65	"
		SUP-9	F	1.00	0.74	0.84	"
	Low alloy steel	SCr-2	G	1.35	0.74	3.18	"
		SCr-4	H	1.04	0.71	3.56	"
		SCM-2	I	1.32	0.74	1.61	"
		SCM-4	J	0.56	0.75	0.98	"
$\sigma_{0.2}$ 100 kg/mm ²	Carbon steel	S 30C	A	4.15	0.80	4.12	"
		S 40C	B	6.59	0.83	5.61	"
		S 50C	C	104.0	0.77	3.90	"
		SAE 1041	D	0.65	0.78	0.96	"
	Spring steel	SUP-6	E	102.0	0.78	2.50	"
		SUP-9	F	113.0	0.71	1.51	"
	Low alloy steel	SCr-2	G	116.0	0.69	2.44	"
		SCr-4	H	110.0	0.73	2.80	"
		SCM-2	I	111.0	0.72	2.04	"
		SCM-4	J	116.0	0.69	1.60	"

荷重が 80 % に相当する条件でも、レラクセーション量はきわめて多いので、このような不完全焼入組織の材料は耐レラクセーション性に顕著な悪影響を及ぼすことが推定できる。SAE 1041 鋼は SC 材より Mn 含有量が多いため、焼入性能もよく、炭素鋼の中ではすぐれた耐レラクセーション性を示す。ばね鋼 SUP-6 SUP-9 は両者ともレラクセーション性は上位の成績を示す。低合金鋼については、Cr 鋼と Cr-Mo 鋼の 2 種と 4 種を選んで、主として炭素含有量とレラクセーション性の比較を行なう目的で実施したが、結果は目標耐力 115 kg/mm^2 と 100 kg/mm^2 の場合で必ずしも同傾向を認めず、Cr 鋼の 2 種と 4 種、Cr-Mo 鋼の 2 種と 4 種、では明りような差異は認めにくい。いずれにしても熱処理鋼棒のレラクセーション性は、導入荷重の比率によって大きく影響されることが認められる。このことから見れば、レラクセーション量の絶対値が少なく、さらに導入応力条件が多少変化しても、レラクセーション量が大きく変化しない鋼種が PC 鋼棒としては安定した性質を有するものと見られる。このためには Fig. 3, 4 に示した結果が鋼種判定上の参考になるものと考えられる。しかし図中の結果は二条件での試験値をそのまま直線で結んだものであるので、さらに詳細な検討のためには数多くの試験値で比較する必要がある。この試験での優劣順位を実測耐力の 80

% 近くの導入条件と比較すると、炭素鋼 S30C, S40C, S50C は 3.5 % 以上のレラクセーション量を示し、SAE 1041, SCr-2, SCr-4, SUP-6 は 2 ~ 3 % 前後、SCM-2, SCM-4, SUP-9 は 1 % 前後の値で、ほぼこの順位に耐レラクセーション性がすぐれているものと見られる。

5. レラクセーション試験成績と機械的性質の関連

レラクセーション試験成績と機械的性質との関連性を検討するため、引張強度比、破断伸び率とレラクセーション量との関係を図示すると Fig. 5 のようである。この試験の範囲では引張強度比の高い鋼種ほど、レラクセーション量の少ない傾向がある。このことは強じん鋼ほど耐レラクセーション性に有利で、熱処理鋼棒では炭素鋼より合金鋼のほうがレラクセーション性がすぐれていることになる。次に破断伸び率とレラクセーション量の関係を示すと Fig. 6 のようで、伸び率が大きいほどレラクセーション量の少ない傾向が

Fig. 3 Relation between relaxation per cent and $\frac{\text{actual yield strength}}{\text{stretching stress}}$, ratio

Fig. 4 Relation between relaxation per cent and $\frac{\text{actual yield strength}}{\text{stretching stress}}$, ratio

Fig. 5 Relation between relaxation per cent and ratio of σ_s/σ_B

Fig. 6 Relation between relaxation per cent and elongation

Fig. 7 Relation between relaxation per cent and tempering temperatures

見受けられる。このことは焼もどし処理温度と関連するものと考えられるので Fig. 7 にこの関係を示すと、焼もどし温度の高い鋼種ほど、レラクセーション量の少ない傾向が見られる。これらの一般的な機械的性質は必ずしも相い反する性質ではないので、熱処理鋼棒のレラクセーション性を論ずる場合の一応の目安になりうるものと考えられる。

6. 結 言

構造用炭素鋼, S30C, S40C, S50C, SAE1041, ばね鋼SUP-6, SUP-9, 低合金鋼SCr-2, SCr-4, SCM-2, SCM-4, 10 鋼種を選択して、焼入焼もどし処理を行なって、耐力 100 kg/mm², 引張強度 115 kg/mm², 伸び 6 % および耐力 115 kg/mm², 引張強度 130 kg/mm², 伸び 5 % 以上を目標とした鋼棒について耐レラクセーション特性を検討した。

(I) レラクセーション特性について

この試験では目標耐力を 100 kg/mm² とした場合と、115 kg/mm² の場合、あるいはこれらの実測耐力に対する導入応力条件によって、試験結果の優劣順位が多少異なる。レラクセーション量に最も大きく影響するのは、実測耐力に対する導入応力の比率であるが、PC 鋼棒としてはレラクセーション量の絶対値が少なく、さらに導入荷重条件が変化しても、レラクセーション量が大きく変化しない鋼種が望ましいと考えられる。結論を得るためには実験値の少ないうらみはあるが、レラクセーション量の絶対値が大きい鋼種は、導入応力条件に影響され、レラクセーション特性が不安定で

ある傾向が見られる。またレラクセーション量の大きく現われる鋼種は、負荷後 1 ~ 2 時間以後の減少量が大きく、短時間試験結果から長時間の外挿値を検討することは危険性のあることを認めた。鋼種間の優劣は実測耐力の 80 % 近くの導入応力条件で 20 h のレラクセーション量は、炭素鋼 S30C, S40C, S50C は 3.5 % 以上, SAE 1041, SCr-2, SCr-4, SUP-6 は 2 ~ 3 % 前後, SCM-2, SCM-4, SUP-9 は 1 % 前後の成績で、ほぼこの順位にレラクセーション量が少ないことを認めた。鋼棒径 19 mm 程度を基準とすると、引張強度 115 kg/mm², 目標材に対しては炭素鋼で強度が保証され、レラクセーション量の少ない SAE 1041 鋼が推奨される。引張強度 130 kg/mm² 目標材に対しては、炭素鋼では不十分で、ばね鋼、低合金鋼の中から選択する必要がある、最もレラクセーション量の少ない SUP-9, SCM-4 が推奨される。

(II) 機械的性質とレラクセーション性の関連性について

引張強度比、伸び率の値が大であるほど、レラクセーション量の少ない傾向を認めた。また、焼もどし温度とも関連があり、焼もどし温度の高くとれる鋼種ほどレラクセーション量の少ない傾向を認めた。熱処理鋼棒では、焼もどし軟化抵抗の大きい鋼種で、できるだけ高い焼もどし温度域で目標強度が得られ、破断伸びあるいは絞り率の大きい安定した機械的性質を有する鋼棒が耐レラクセーション性もすぐれているものと考えられる。

(774 頁より)

軸方向集中荷重を受ける円筒シャーレの応力算定について (Beitrag zur Berechnung der Kreiszy-linderschale unter axialer Einzellast) Volker Luft, Dissertation an der Technischen Hochschule Karlsruhe, (1959)

軸方向にプレストレスされた円筒シャーレのように妻壁を有する閉じた等厚円筒シャーレが同一母線上の両端で方向反対、大きさ同じの軸方向集中力を受ける場合の応力およびひずみが弾性曲げ理論によって近似的に導かれている。Zerna の近似式において、応力関数 ϕ の形を二重フーリエ級数とすることは、級数の収斂性が悪いことによる数値計算上の困難を増すので避け、予想しうる応力分布を表わすために都合のよい次の式を採用している。 ϕ をこのように表わすことにより、

$$\phi = \sum_{\varphi} m A m e^{i\varphi} \sin m \frac{\pi x}{L}$$

ここに φ : 円周方向変化量

x : 軸方向変化量

L : シャーレの長さ

集中力を φ 方向にフーリエ展開できなくなるのでこの集中力をシャーレの両端から軸方向に C の小区間に等分布する軸方向せん断力 N_{xy} に置換え、この荷重分布を軸方向にフーリエ展開し、その後、 C を 0 とすることによって所期の近似解を得ようとしている。更に、この C が有限の値の場合について数値計算を行ない、シャイベに同様の集中力がかかった場合と比較し、シャーレとして解いた場合に集中力の影響が円周方向に広がる割合が少なくなること、および、 $C = 39.25$ cm の場合の載荷点付近の N_{φ} の値が危険側になることを示している。

(富永 恵)

(796 頁へ)